

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ
С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ**

Антонов Александр Игоревич

*кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехники и электрооборудования,
Омский институт водного транспорта (филиал),
Сибирский государственный университет водного транспорта
Омск, Россия
E-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru*

Руди Дмитрий Юрьевич

*старший преподаватель
кафедры электротехники и электрооборудования
Омский институт водного транспорта (филиал),
Сибирский государственный университет водного транспорта
Омск, Россия*

Хацевский Константин Владимирович

*доктор технических наук,
профессор кафедры электротехники и электрооборудования
Омский институт водного транспорта (филиал),
Сибирский государственный университет водного транспорта
Омск, Россия*

Актуальность исследования: в настоящее время широкое применение в области электроэнергетики нашли полупроводниковые преобразователи [6]. Одним из самых распространённых полупроводниковых преобразователей является частотный преобразователь, так как он обеспечивает получение трёхфазного напряжения с регулируемой частотой из трёхфазного напряжения сети. Однако он, равно как и другие полупроводниковые преобразователи, является причиной появления гармоник и, как следствие, несинусоидальной формы кривой напряжений [1]. Гармоники являются причиной таких негативных воздействий в электрической сети, как сопутствующий нагрев обмоток двигателей, трансформаторов и т.д., ложные срабатывания в распределительных сетях, асимметрия в промышленных сетях с трехфазными источниками при возникновении гармоники на одной фазе, возникновение шума в сетях связи, влияние на смежные слаботочные и силовые кабели за счет наведенной ЭДС, а также при появлении гармоник есть потребность увеличения сечения нулевых проводов в связи с суммированием гармоник кратных 3-ей в трехфазных сетях [3]. Поэтому исследование гармонических составляющих напряжения является актуальной задачей.

Предмет исследования: процессы, протекающие в электрических сетях с частотным преобразователем.

Цель исследования: выявить наличие гармонических составляющих напряжения в электрических сетях с частотным преобразователем.

Объект исследования: исследовательский стенд, имитирующий работу электрических сетей с частотным преобразователем.

Методы исследования: в процессе выполнения исследований применялись научно-техническое обобщение литературных источников по исходным предпосылкам исследований, методы теоретических основ электротехники и теории электрических сетей, метод

аналитических исследований, методы системного анализа. Экспериментальные исследования выполнялись комплексным методом с использованием прибора «Ресурс-ПКЭ».

Результаты исследования: на основе проведённых исследований показано, что частотный преобразователь является источником гармонических составляющих напряжений, при этом гармоники появляются только в определённых участках электрической цепи.

Ключевые слова: качество электрической энергии, электрическая сеть, преобразователь частоты, несинусоидальность напряжений, высшие гармоники

STUDY OF THE QUALITY OF ELECTRIC POWER IN ELECTRIC NETWORKS WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS

Alexander I. Antonov

*Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Electrical Engineering and Electrical Equipment,
Omsk Institute of Water Transport (branch),
Siberian State University of Water Transport
Omsk, Russia
E-mail: aleksandr_antonov_85@mail.ru*

Dmitry Yu. Rudy

*Senior Lecturer Department of Electrical
Engineering and Electrical Equipment,
Omsk Institute of Water Transport (branch),
Siberian State University of Water Transport
Omsk, Russia*

Konstantin V. Khatsevsky

*Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Electrical
Engineering and Electrical Equipment,
Omsk Institute of Water Transport (branch),
Siberian State University of Water Transport
Omsk, Russia*

At present, semiconductor converters have found wide application in the electric power industry [6]. One of the most common semiconductor converters is a frequency converter, as it provides a three-phase voltage with adjustable frequency from a three-phase mains voltage. However, it, like other semiconductor converters, is the cause of the appearance of harmonics and, as a result, the non-sinusoidal shape of the voltage curve [1]. Harmonics are the cause of such negative effects in the electrical network as concomitant heating of the windings of motors, transformers, etc., false alarms in distribution networks, asymmetry in industrial networks with three-phase sources when harmonics occur in one phase, the occurrence of noise in communication networks, the influence on adjacent low-current and power cables due to the induced EMF, and also with the appearance of harmonics, there is a need to increase the cross section of neutral wires due to the summation of harmonics multiple of the 3rd in three-phase networks [3]. Therefore, the study of the harmonic components of the voltage is an urgent task.

Subject of research: processes occurring in electrical networks with a frequency converter.

Purpose of research: to identify the presence of harmonic voltage components in electrical networks with a frequency converter.

Object of research: a research stand that simulates the operation of electrical networks with a frequency converter.

Methods of research: in the process of performing research, scientific and technical generalization of literary sources on the initial prerequisites for research, methods of the theoretical foundations of electrical engineering and the theory of electrical networks, the method of analytical research, methods of system analysis were used. Experimental studies were carried out by a complex method using the Resurs-PKE device.

Results of research he study: based on the studies carried out, it was shown that the frequency converter is a source of harmonic voltage components, while harmonics appear only in certain sections of the electrical circuit.

Keywords: quality of electrical energy, electrical network, frequency converter, non-sinusoidal voltage, higher harmonics

Введение

Поскольку частотные преобразователи, хоть и являются источниками гармоник, нашли широкое применение в системах управления электроприводом, полностью отказаться от них не представляется возможным [2]. Поэтому имеет существенное значение исследование электрической сети, где находится данный преобразователь, на наличие гармоник. Эти исследования необходимы для того, чтобы знать, какие технические решения нужно предпринять в том или ином случае для защиты от гармоник, и нужно ли их предпринимать вообще.

Исследования проводились на лабораторном стенде (рис. 1), содержащем модуль питания, модуль преобразователя частоты, служащий для управления асинхронным трёхфазным двигателем с короткозамкнутым ротором и силовой модуль, содержащий асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Схема исследования приведена на рисунке 2.

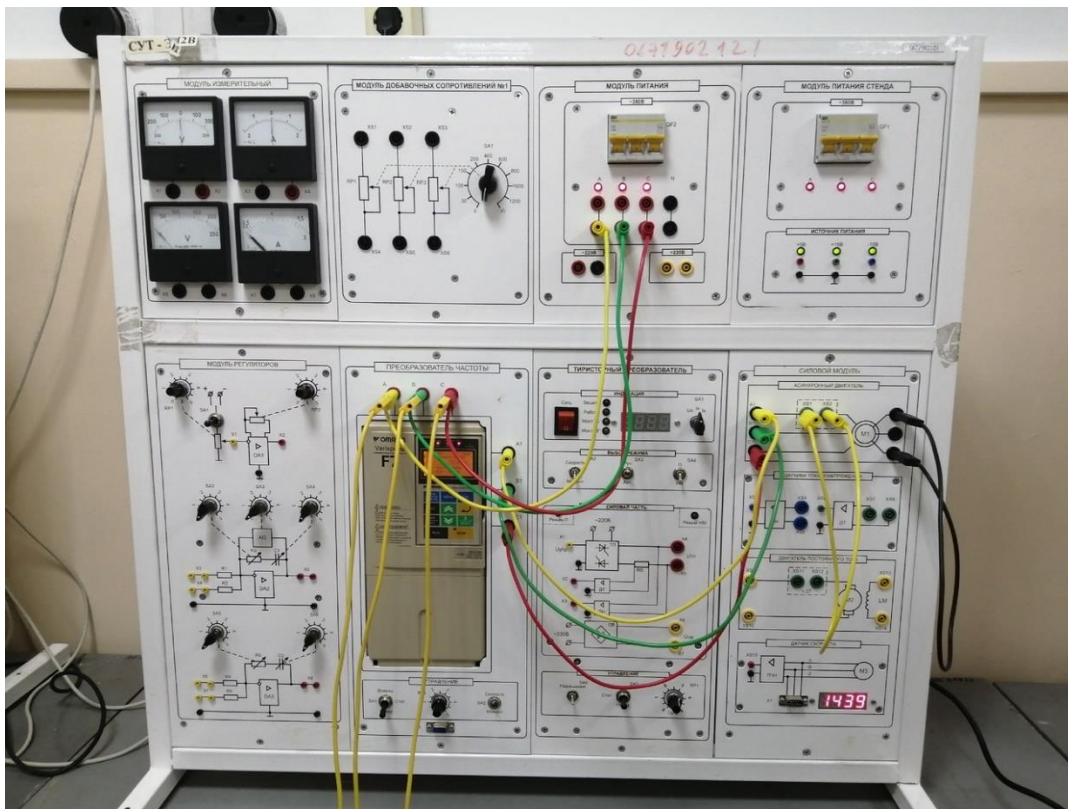


Рисунок 1 – Лабораторный стенд с преобразователем частоты

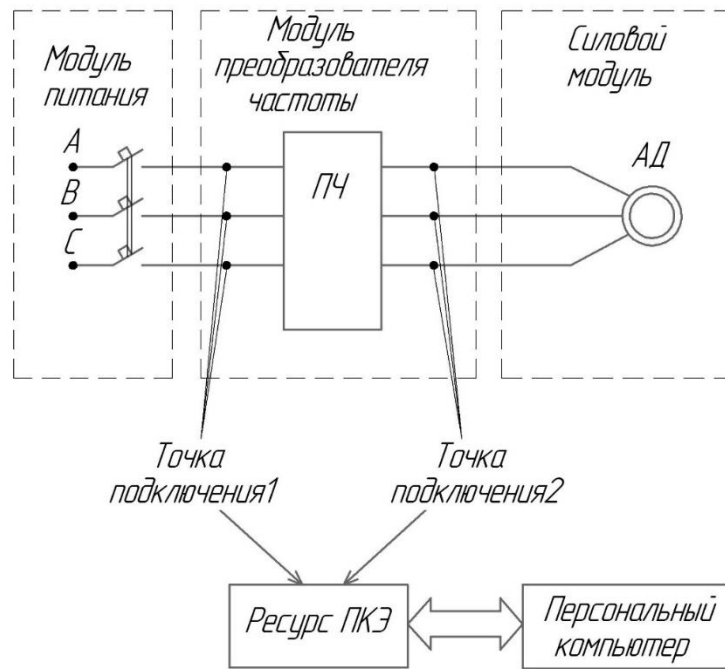


Рисунок 2 – Схематичное представление электрической сети с преобразователем частоты

В качестве средства измерения гармонических составляющих напряжения на объекте исследования использовался прибор-анализатор качества электрической энергии «Ресурс-ПКЭ» модификации «Ресурс-ПКЭ-1.7-ои-А» (рис. 3), предназначенный для автоматических измерений показателей КЭ в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30-2013 для оценки соответствия значений показателей КЭ установленным нормам согласно ГОСТ 32144-2013 [4]. Прибор является сертифицированным оборудованием и имеет свидетельство о поверке №19-0320 [2].

С помощью прибора «Ресурс-ПКЭ» в данном случае измеряются значения суммарных гармонических составляющих напряжения (K_U) и коэффициента n-ой гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$). С помощью персонального компьютера, подключенного к Ресурсу-ПКЭ через интерфейс RS-232, визуализируются все полученные результаты измерений.



Рисунок 3 – Передняя панель прибора «Ресурс-ПКЭ»

Результаты и обсуждение

Для измерения показателей качества электрической энергии использовались две точки подключения «Ресурс-ПКЭ»: точка подключения 1 использовалась для подключения прибора на входе преобразователя частоты, а точка подключения 2 – на его выходе.

Результаты мониторинга основных показателей качества электрической энергии при подключении прибора к точке 1 представлены на рисунке 4. Из результатов видно, что ни один из показателей качества электрической энергии, включая суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений и коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, не выходит за нормируемые значения, установленные ГОСТ 32144-2013 [4]. То есть на участке электрической сети от источника питания до преобразователя частоты значения гармонических составляющих напряжения не превышают нормативных значений согласно [4].

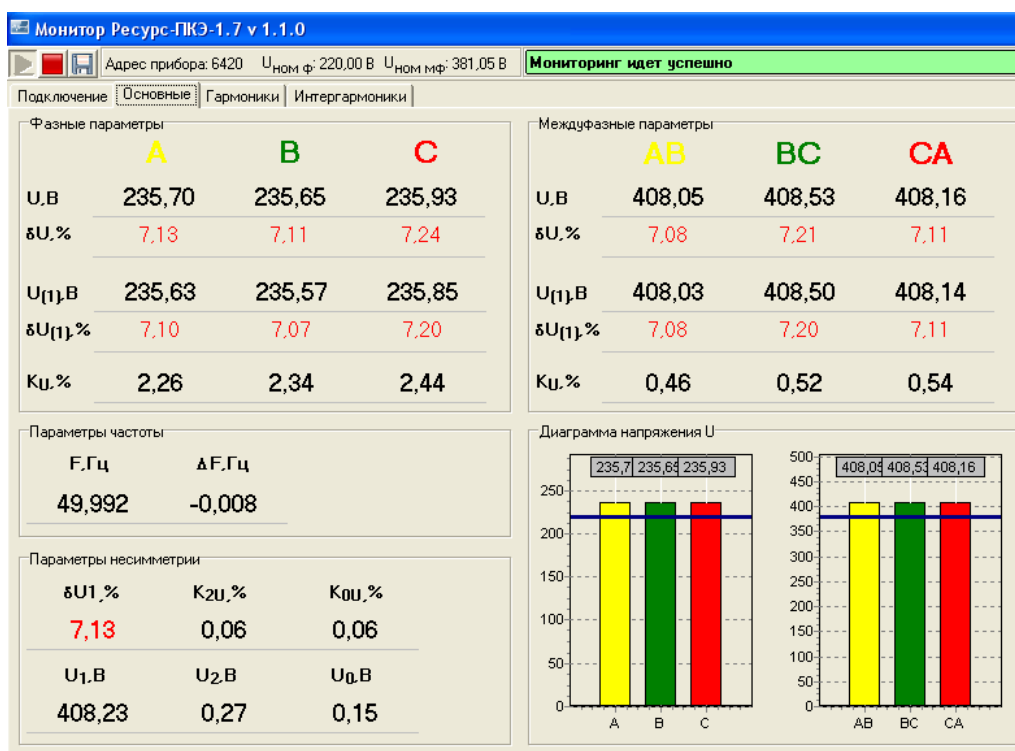


Рисунок 4 – Результаты мониторинга основных показателей качества электрической энергии в точке подключения 1

Однако в точке подключения 2 результаты совершенно иные (рис. 5). Из рисунка 5 видно, что значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения превышают нормируемые значения в несколько раз. Для сравнительного анализа результатов измерений K_U , значения измерений данного показателя качества электрической энергии на входе преобразователя частоты (точка подключения 1) и на его выходе (точка подключения 2) сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты измерения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

| Место измерений | Значение K_U на фазе А, % | Значение K_U на фазе В, % | Значение K_U на фазе С, % |
|---|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| На входе преобразователя частоты (точка подключения 1) | 2,26 | 2,34 | 2,44 |
| На выходе преобразователя частоты (точка подключения 2) | 32,70 | 31,34 | 31,70 |

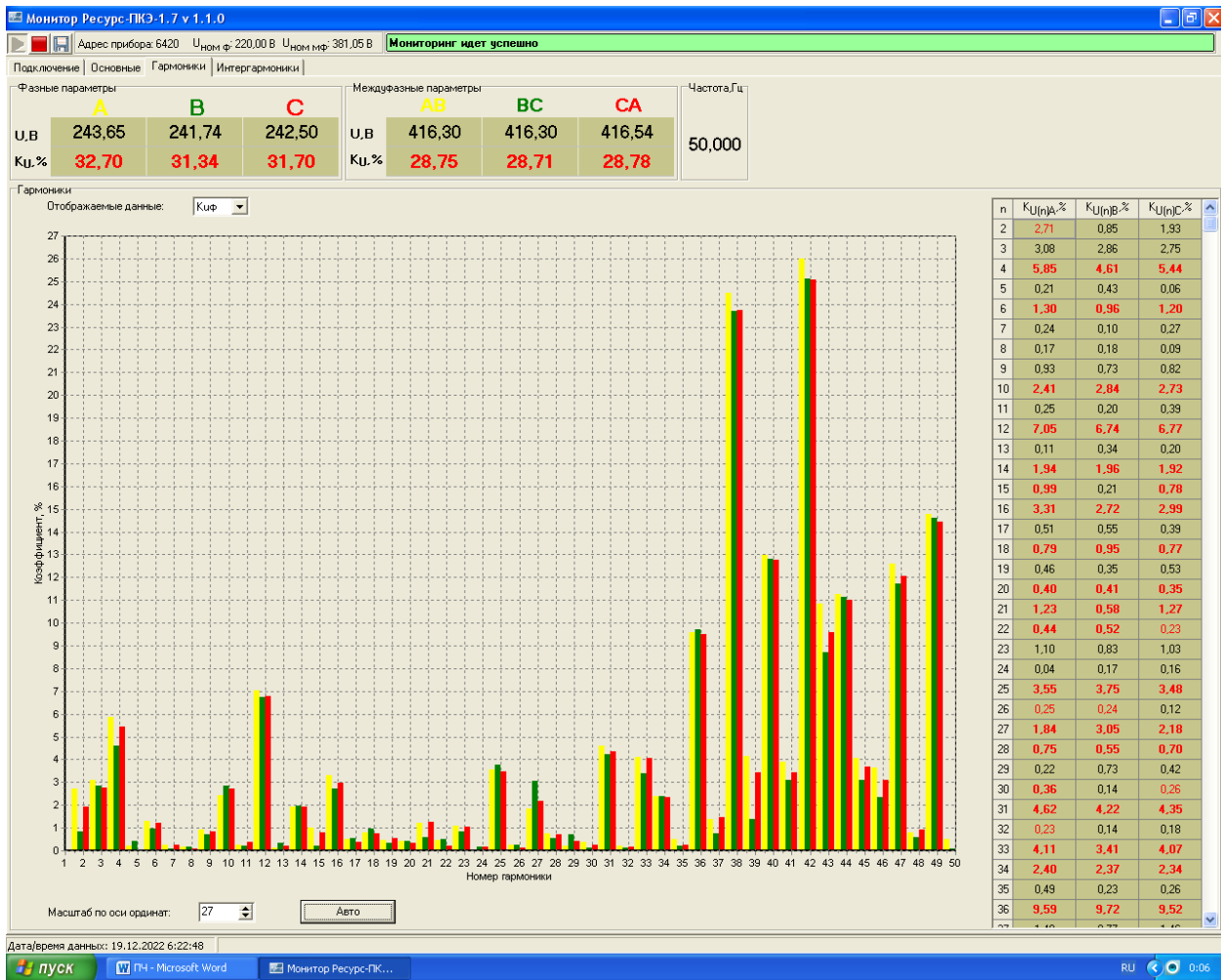


Рисунок 5 – Результаты мониторинга основных показателей качества электрической энергии в точке подключения 2

Та же картина обнаружилась и для коэффициентов n-ой гармонической составляющей напряжения (табл. 2). На всех фазах значения $K_{U(n)}$ для большинства гармоник превышают нормированные значения, установленные ГОСТ 32144-2013. Данные значения $K_{U(n)}$ представлены в таблице 2 жирным шрифтом.

Таблица 2

Данные коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения на выходе преобразователя частоты

| № гармоники | Значение $K_{U(n)}$ на фазе А, % | Значение $K_{U(n)}$ на фазе В, % | Значение $K_{U(n)}$ на фазе С, % |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 2 | 2,71 | 0,85 | 1,93 |
| 3 | 3,08 | 2,86 | 2,75 |
| 4 | 5,85 | 4,61 | 5,44 |
| 5 | 0,21 | 0,43 | 0,06 |
| 6 | 1,30 | 0,96 | 1,20 |
| 7 | 0,24 | 0,10 | 0,27 |
| 8 | 0,17 | 0,18 | 0,09 |
| 9 | 0,93 | 0,73 | 0,82 |
| 10 | 2,41 | 2,84 | 2,73 |
| 11 | 0,25 | 0,20 | 0,39 |
| 12 | 7,05 | 6,74 | 6,77 |
| 13 | 0,11 | 0,34 | 0,20 |

| | | | |
|----|-------|-------|-------|
| 14 | 1,94 | 1,96 | 1,92 |
| 15 | 0,99 | 0,21 | 0,78 |
| 16 | 3,31 | 2,72 | 2,99 |
| 17 | 0,51 | 0,55 | 0,39 |
| 18 | 0,79 | 0,95 | 0,77 |
| 19 | 0,46 | 0,35 | 0,53 |
| 20 | 0,40 | 0,41 | 0,35 |
| 21 | 1,23 | 0,58 | 1,27 |
| 22 | 0,44 | 0,52 | 0,23 |
| 23 | 1,10 | 0,83 | 1,03 |
| 24 | 0,04 | 0,17 | 0,16 |
| 25 | 3,55 | 3,75 | 3,48 |
| 26 | 0,25 | 0,24 | 0,12 |
| 27 | 1,84 | 3,05 | 2,18 |
| 28 | 0,75 | 0,55 | 0,70 |
| 29 | 0,22 | 0,73 | 0,42 |
| 30 | 0,36 | 0,14 | 0,26 |
| 31 | 4,62 | 4,22 | 4,35 |
| 32 | 0,23 | 0,14 | 0,18 |
| 33 | 4,11 | 3,41 | 4,07 |
| 34 | 2,40 | 2,37 | 2,34 |
| 35 | 0,49 | 0,23 | 0,26 |
| 36 | 9,63 | 9,78 | 9,53 |
| 37 | 1,37 | 0,71 | 1,43 |
| 38 | 24,50 | 23,73 | 23,75 |
| 39 | 4,15 | 1,49 | 3,29 |
| 40 | 12,92 | 12,76 | 12,69 |

То есть на участке исследуемой электрической сети от преобразователя частоты до асинхронного трёхфазного электродвигателя значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения и коэффициентов n -ой гармонической составляющей напряжения не соответствуют нормативным значениям, установленным [4]. Следовательно, на данном участке электрической сети качество электрической энергии по данным показателям не соответствует установленным нормам.

Заключение и выводы

Резюмируя всё вышесказанное, можно сделать следующие выводы:

1. Преобразователь частоты, как и любой другой полупроводниковый преобразователь, является источником гармонических составляющих напряжения.

2. На выходе преобразователя частоты значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения и коэффициентов n -ой гармонической составляющей напряжения не соответствуют нормативным значениям, установленным ГОСТ 32144-2013.

3. На входе преобразователя частоты качество электрической энергии по таким показателям качества, как суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент n -ой гармонической составляющей напряжения, соответствуют установленным нормам.

Объяснить соответствие суммарного коэффициенты гармонических составляющих напряжения и коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения установленным нормам можно тем, что для уменьшения неблагоприятного влияния гармонических искажений, создаваемых преобразователем частоты в процессе работы, на электросеть в самом преобразователе частоты используется фильтрация в виде LC-фильтра звена постоянного тока (ЭМС-фильтр) [5]. ЭМС-фильтры обеспечивают соблюдение норм по электромагнитной совместимости технических средств и защищают от токов утечки, вызванных емкостью проводников [6]. В совокупности с экранированным кабелем двигателя достигается нормальная работа техники.

Литература

1. Акимов, М. Н. Основы электромагнитной безопасности : учеб. пособие / М. Н. Акимов, С. М. Аполлонский. – Санкт-Петербург : Лань, 2017. – 200 с. – Текст : непосредственный.
2. Антонов, А. И. Повышение качества функционирования электрических сетей на основе компьютерного моделирования несимметричных режимов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / А. И. Антонов. – Новосибирск, 2020. – 187 с. – Текст : непосредственный.
3. Денчик, Ю. М. Электромагнитная совместимость технических средств в примерах и задачах: учеб. пособие / Ю. М. Денчик, В. И. Клеутин, А. А. Руппель. – Омск : ОИВТ, 2017. – 128 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: межгосударственный стандарт: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст. : дата введения 2014-07-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с. – Текст: непосредственный.
5. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Высшая школа. – 1994. – 318 с. – Текст : непосредственный.
6. Копылов, И. П. Электрические машины / И. П. Копылов. – М. : Энергаториздат. – 1986. – 457 с. – Текст : непосредственный.